

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВАЯ ГЕОЛОГИЯ,
ГЕОФИЗИКА, МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО И ГЕОМЕТРИЯ НЕДР

Краткое сообщение

УДК 553.41:551.2.01(571.51)

EDN: VKUYSI

DOI: 10.21285/2686-9993-2024-47-3-316-328

**Система повышения качества сигнала радиотелеметрии
для повышения эффективности дистанционного зондирования
Земли с применением беспилотных летательных аппаратов
в режиме кинематики реального времени****В.В. Ерофеев^a, А.Н. Костерев^b, Е.Д. Валькова^c, В.В. Матыцин^d**^{a-d}*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия*

Резюме. При проведении дистанционного зондирования Земли с помощью беспилотных летательных аппаратов зачастую возникает проблема потери связи между базовой станцией оператора и непосредственно беспилотным летательным аппаратом из-за естественных преград для распространения радиосигнала (рельеф, растительность и так далее) и вследствие большой дальности отлета аппарата. Особенно критична такая потеря связи в случае, если съемки ведутся с использованием технологии кинематики реального времени, которая обеспечивает передачу корректирующих поправок с базовой станции на контролер беспилотного летательного аппарата для обеспечения высокоточной пространственной привязки получаемых данных. Цель данной работы заключалась в создании системы ретрансляции сигнала с возможностью ее установки на беспилотный летательный аппарат легкого класса, способный зависать в воздухе более трех часов, для передачи радиосигнала с базы на беспилотный летательный аппарат через стороннее устройство за естественные преграды рельефа и на дальние расстояния. В ходе исследования проведено сравнение различных способов передачи сигнала через стороннее устройство и выявлена наиболее подходящая конфигурация, отвечающая требованиям качества передачи сигнала и простоты конструкции для выполнения работ в труднодоступных регионах. Для создания ретранслятора применялись радиомодемы RFD различных серий и апробировались различные частоты работы в связи с их доступностью и широкой возможностью настройки. В результате проведения работы была получена ретрансляционная пара радиомодемов, позволяющая перенаправлять радиосигнал от базовой станции на беспилотный летательный аппарат без потери качества и скорости передачи данных для выполнения работ дистанционного зондирования Земли с использованием технологии кинематики реального времени. Второстепенной особенностью ретранслятора является использование его как поисковой системы при аварийной посадке беспилотного летательного аппарата в случаях, когда поисковой маяк недоступен.

Ключевые слова: ретранслятор, радиомодем, телеметрия, передача сигнала, беспилотный летательный аппарат, рельеф, ретрансляционная пара

Для цитирования: Ерофеев В.В., Костерев А.Н., Валькова Е.Д., Матыцин В.В. Система повышения качества сигнала радиотелеметрии для повышения эффективности беспилотных летательных аппаратов дистанционного зондирования Земли в режиме кинематики реального времени // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 316–328. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-316-328>. EDN: VKUYSI.



APPLIED MINING AND PETROLEUM FIELD GEOLOGY, GEOPHYSICS, MINE SURVEYING AND SUBSOIL GEOMETRY

Brief report

Radio telemetry signal quality enhancement system to improve Earth remote sensing using unmanned aerial vehicles efficiency in real-time kinematics mode

Vladimir V. Erofeev^a, Alexey N. Kosterev^b, Evgenia D. Valkova^c, Victor V. Matytsin^d

^{a-d}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. When conducting remote sensing of the Earth using unmanned aerial vehicles, the problem of connection disruption between the operator's base station and the unmanned aerial vehicle controller often arises due to natural obstacles to radio signal propagation (relief, vegetation, etc.) as well as a large range of the vehicle. The loss of connection is especially critical when surveying is carried out using a real-time kinematics technology, which ensures the transmission of correction amendments from the base station to the unmanned aerial vehicle controller to ensure high-precision spatial referencing of the obtained data. The objective of the work was to create a signal retransmission system with the possibility to install it on a light-class unmanned aerial vehicle capable of hovering in the air for more than three hours, for transmitting a radio signal from the base to the unmanned aerial vehicle via a third-party device beyond natural terrain obstacles and over long distances. Having compared various methods of signal transmission via a third-party device, the authors determined the most suitable configuration that meets the requirements for signal transmission quality and design simplicity for performing work in hard-to-reach regions. To create the repeater, RFD radio modems of various series were used and various operating frequencies were tested due to their availability and wide customization capabilities. The work resulted in obtaining a repeater pair of radio modems that make it possible to redirect the radio signal from the base station to the unmanned aerial vehicle without any loss of data quality and transfer rate for performing remote sensing of the Earth using the real-time kinematics technology. A secondary feature of the repeater is the possibility to use it as a search system in case of unmanned aerial vehicles emergency landing if the search beacon is unavailable.

Keywords: repeater, radio modem, telemetry, signal transmission, unmanned aerial vehicle, relief, repeater pair

For citation: Erofeev V.V., Kosterev A.N., Valkova E.D., Matytsin V.V. Radio telemetry signal quality enhancement system to improve Earth remote sensing unmanned aerial vehicles efficiency in real-time kinematics mode. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):316-328. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-316-328>. EDN: VKUYSI.

Введение

Современные исследования в области наук о Земле почти не обходятся без работы с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1, 2]. В последние годы такие съемки получают все большее распространение в российской и мировой практике [3, 4]. При выполнении маловысотных геофизических и геодезических работ важным аспектом является вопрос высокоточной привязки координат данных. В то же время точность прохождения полетных маршрутов зависит от точности определения GNSS-координат (Global Navigation Satellite System – система глобального позиционирования) приемником, установленным на борту беспилотного воздушного судна. Существует методика повышения качества позиционирования БПЛА, однако для этого на протяжении всего полета должна поддерживаться связь между находящимся на базовой точке и радиомодемом, установленным на БПЛА, при помощи системы передачи радиосигнала [5, 6]. При

этом зачастую работы проводятся на участках со сложной морфологией рельефа [7, 8], что служит причиной возникновения проблемы организации связи с БПЛА.

Система ретрансляции сигнала широко применяется в сотовой и радиосвязи с наземным позиционированием ретранслятора [9]. Существуют заводские решения для усиления сигнала, которые позволяют увеличить дальность передачи сигнала радиотелеметрии, но не могут передавать сигнал за естественные преграды рельефа [10]. Как правило, данные усилители сигнала выпускаются под определенные заводские решения, что в рассматриваемых условиях не удовлетворяет нашим требованиям компактности, стоимости и функциональности.

Для выполнения высокоточных геофизических работ и работ дистанционного зондирования земли (аэрофотограмметрия, лидарная съемка и ряд геофизических изысканий [11–13]) применяется система RTK (Real Time Kinematic – кинематика реально-

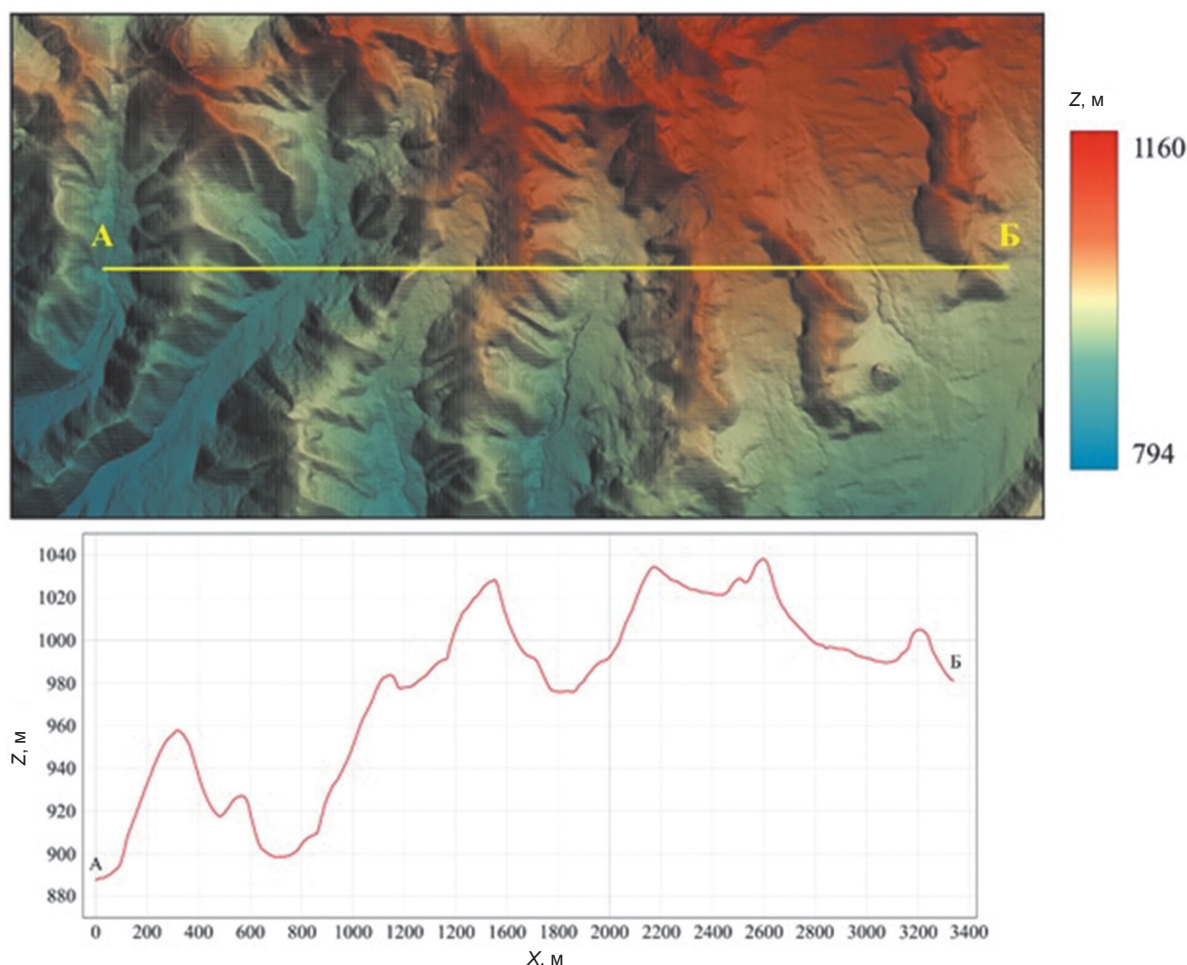


Рис. 1. Перепад высот сложного рельефа по линии АБ
Fig. 1. Complex relief elevation changes along the AB line

го времени) – совокупность приемов и методов получения плановых координат и высот точек местности сантиметровой точности с помощью спутниковой системы навигации посредством получения поправок с базовой станции, принимаемых аппаратурой пользователя [14].

Основным принципом работы RTK является передача поправок на ровер (приемник, который движется по точкам во время съемки). Поправки фиксируются базовой станцией, которая на протяжении всей работы находится в неподвижном состоянии. Для постоянной передачи поправок необходима прямая видимость между ровером (БПЛА) и базой, что в условиях сложного рельефа не представляется возможным (рис. 1). Кроме того, при выполнении работ на площадях 100 км² и более удаленность ровера от базы может достигать более 7 км, что негативно сказывается на передаче сигнала, в связи с чем поправки с базовой станции не будут приходить на ровер и, как следствие, ухудшится каче-

ство позиционирования БПЛА, а вместе с тем и привязка получаемых данных.

Материалы и методы исследования

Для применения системы ретрансляции сигнала планируется использовать дополнительный БПЛА мультироторного или самолетного типа с размещенной на нем радиотелеметрией, настроенной на режим ретрансляции сигнала. В такой системе база будет являться главным узлом, а ровер и ретранслятор – второстепенными. Важным условием применения данной системы является прямая видимость между передающими узлами, соответственно База – БПЛА 1 – БПЛА 2 (рис. 2).

Рассмотрено два решения реализации применения ретранслятора.

Первое – использовать БПЛА мультироторного типа, который способен зависать над базой (Ground Control Station – GSC) таким образом, чтобы ровер (БПЛА) всегда нахо-

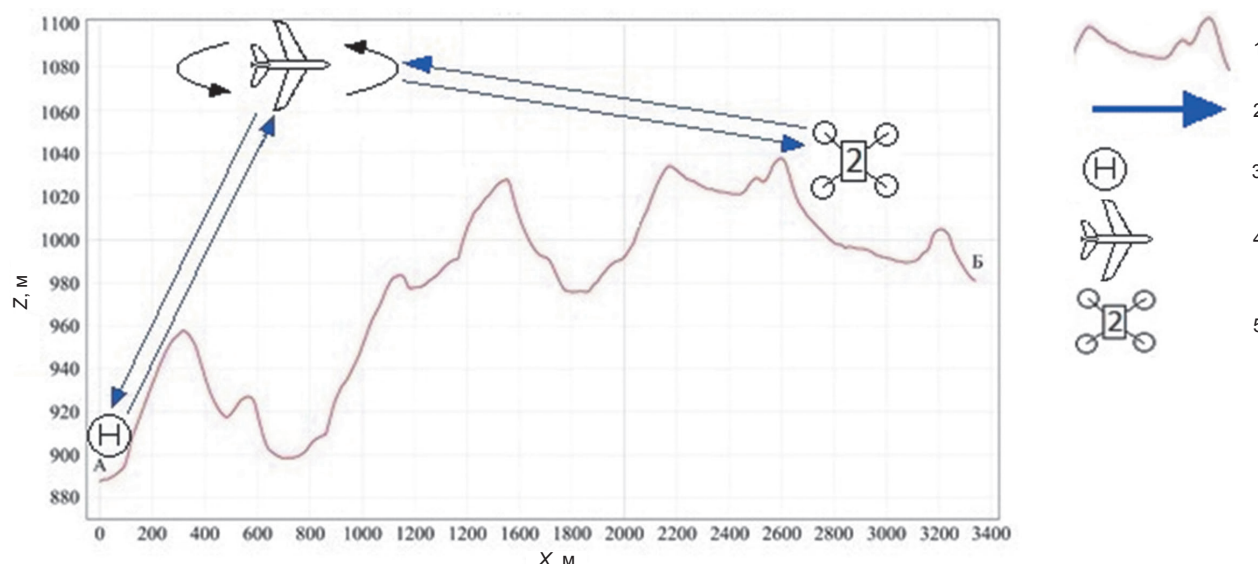


Рис. 2. Схема передачи сигнала радиотелеметрии при установке ретранслятора на беспилотные летательные аппараты мультироторного или самолетного типа:

- 1 – маршрут прохождения полетного задания с обтеканием рельефа;
 2 – направление передачи сигнала радиотелеметрии через ретранслятор;
 3 – базовая станция; 4 – беспилотный летательный аппарат мультироторного или самолетного типа с установленным ретранслятором; 5 – беспилотный летательный аппарат, выполняющий полет с обтеканием рельефа

Fig. 2. Diagram of radio telemetry signal transmission when installing a repeater on a multi-rotor or aircraft-type unmanned aerial vehicle:

- 1 – route of the flight mission with terrain flowing;
 2 – direction of radio telemetry signal transmission through the repeater;
 3 – base station; 4 – multi-rotor or aircraft-type unmanned aerial vehicle with an installed repeater;
 5 – unmanned aerial vehicle performing a flight with terrain flowing

дился в его прямой видимости. Такой способ ретрансляции сигнала предпочтительно применять на участках со сложным рельефом с большими перепадами высот, достигающими 300 м и более, где длина профиля будет до 3–4 км, но из-за морфологических особенностей рельефа сигнал от наземной базы до ровера не будет поступать. При использовании БПЛА мультироторного типа время его полета в режиме зависания составляет 1,5–2 часа. Длительное время полета обусловлено тем, что наибольшие затраты энергии происходят при взлете-посадке, в то время как в режиме зависания происходит наименьший расход заряда батареи [15].

Второй способ заключается в использовании БПЛА самолетного типа [16], который предпочтительно применять на участках со слаборасчлененным рельефом, с перепадами высот не превышающими 150–200 м, где длина профилей полета достигает 7–8 км и сигнал от радиотелеметрии затухает с удалением ровера от базы. В данном случае борт будет курсировать от базы и ровера по циклической траектории таким образом, чтобы база и БПЛА 2 всегда находились в прямой видимости.

Важным критерием использования БПЛА самолетного типа является возможность его запуска в рабочих условиях, обеспечивающих достаточное место для взлета-посадки аппарата. Время работы составит 3–4 часа.

Выбор БПЛА для размещения на нем ретранслятора определяется исходя из условий выполнения работ и обуславливается в первую очередь рельефом местности и целесообразностью применения конкретного типа БПЛА.

Определенное значение имеет организация передачи сигналов.

Для ретрансляции сигнала выбраны радиомодемы RFD900x с полетным контроллером PixHawk Cube Orange (рис. 3). Благодаря широким возможностям настройки данный радиомодем, как и полетный контроллер, предпочтителен для создания ретрансляционной системы для задач БПЛА-съемки.

Принцип работы радиомодемов заключается в приеме-передаче сигнала при помощи многоканальной линии радиосвязи, работающей на определенной частоте. Радиомодемы различаются по мощности рабочей частоты и серии модемов, серии различаются форм-фактором и архитектурой.



Рис. 3. Система передачи сигнала и полетный контроллер:
a – радиомодемы RFD900x; b – полетный контроллер PixHawk Cube Orange
Fig. 3. Signal transmission system and a flight controller:
a – RFD900x radio modems; b – PixHawk Cube Orange flight controller

Данное оборудование позволяет создать многоточечную сеть из нескольких узлов связи. Сеть требует, чтобы одно из устройств взяло на себя роль главного устройства для управления окружающими модемами (рис. 4).

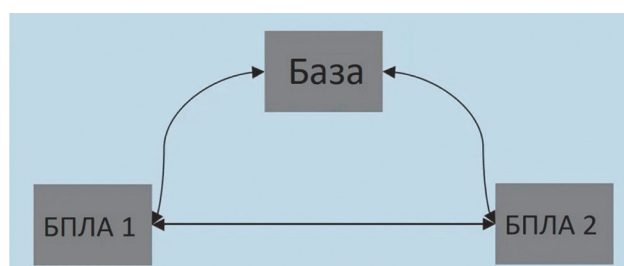


Рис. 4. Типовая многоточечная сеть
Fig. 4. A typical multipoint network

Использование многоточечной сети требует специальной настройки радиомодемов, которая осуществляется при помощи программного обеспечения RFD900 Tools (рис. 5)¹.

В рассматриваемых условиях предлагается задание следующих параметров, показанных на рис. 5.

Приведенная выше система позволяет создать ретрансляционную сеть для передачи сигнала с базы на ровер через ретранслятор как за естественные преграды рельефа, так и

на удаленное расстояние, что позволяет повысить качество привязки координат и соответственно улучшить качество съемки.

При работе с подобной схемой ретрансляции сигнала периодически возникают ошибки связи с БПЛА, что влечет за собой перебои в передаче поправок от базы на ровер и ухудшение выходных данных. Связано это с аппаратной проблемой работы радиомодемов в многоточечной сети.

Можно предложить второй способ создания ретрансляционной сети – использование дополнительной пары радиотелеметрий, связанных между собой на прием-передачу сигнала.

Для связи двух радиомодемов в ретрансляционной паре необходимо соединить каналы приема и передачи сигнала – PIN (контакт). Для получения сигнала в радиомодеме используется PIN7 – Rx, для отправки сигнала используется PIN9 – Tx (рис. 6).

Связав между собой две радиотелеметрии на прием-передачу сигнала следующим образом, контакт Rx второй телеметрии соединяется с контактом Tx третьей телеметрии. Соответственно, контакт Tx второй телеметрии соединяется с контактом Rx третьей телеметрии (telem2 Rx – telem3 Tx, telem2 Tx – telem3 Rx), настроенной на разные каналы (GSC, радио-

¹ RFD900x Multipoint firmware User Manual // Files.rfdesign.com.au. Режим доступа: <https://files.rfdesign.com.au/Files/documents/RFD900x%20Multipoint%20User%20Manual%20V1.0.pdf> (дата обращения: 14.05.2024).

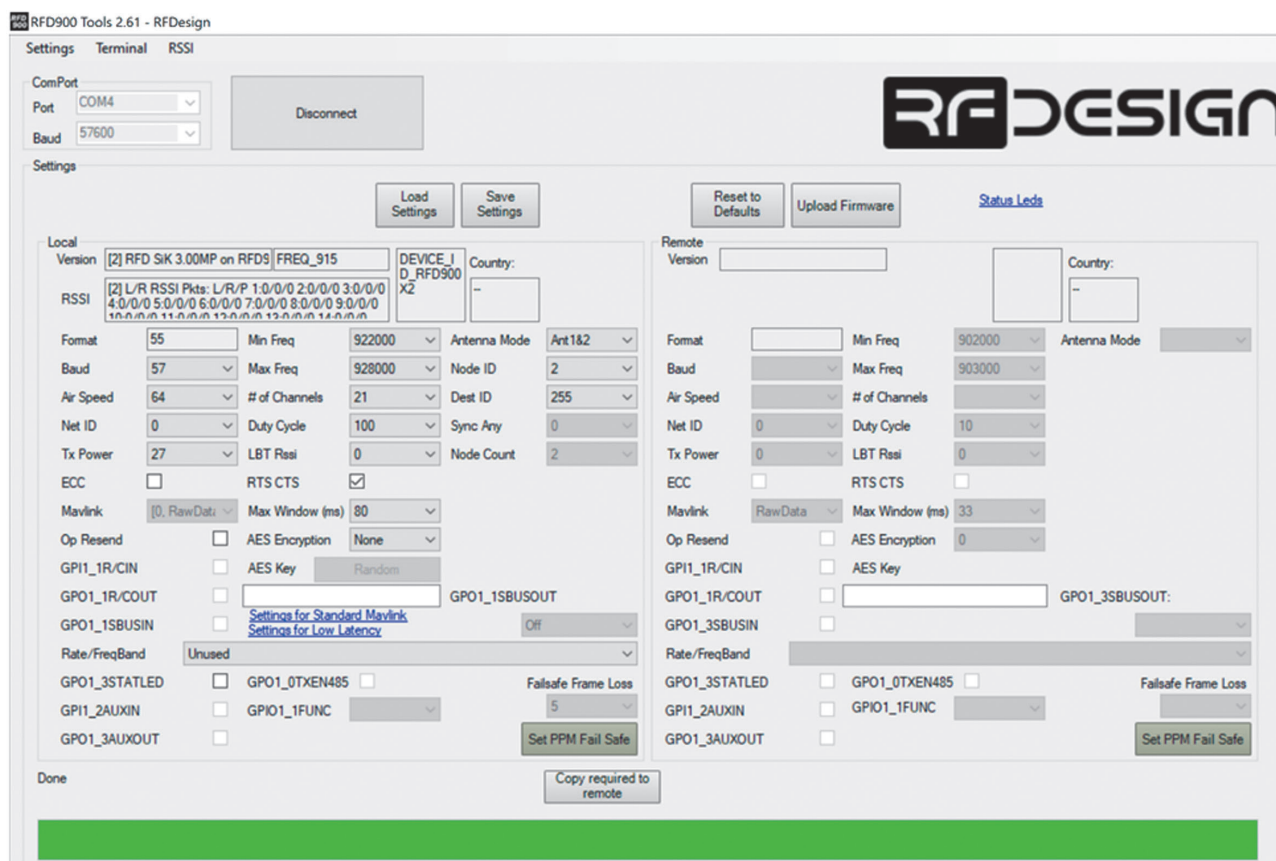


Рис. 5. Визуальный вид программы RFD900 Tools:

Baud – скорость передачи данных; *Air Speed* – скорость передачи данных в эфире в одноканальной форме, кбит/с; *Net ID* – идентификатор сети; *Tx Power* – мощность передачи, дБм; *Min Freq* и *Max Freq* – минимальная и максимальная частота, кГц; *# of Channels* – номер радиоканала; *Duty Cycle* – процент времени, чтобы разрешить передачу; *LBT Rssi* – порог перед передачей; *Max Window (ms)* – максимальный размер транзитного окна, используемый для ограничения максимального времени/задержки; *Antenna Mode* – назначение функции порта антенны; *Node ID* – идентификатор узла; *Dent ID* – идентификатор удаленного узла для связи; *Net Count* – общее количество сетей на одном главном узле; *Ser. brk. x10 ms* – время в миллисекундах для обнаружения обрыва

Fig. 5. Visual view of the RFD900 Tools program:

Baud – data transfer rate; *Air Speed* – data transfer rate on the air in a single-byte form, kbit/s; *Net ID* – network identifier; *Tx Power* – transmission power, dBm; *Min Freq* and *Max Freq* – minimum and maximum frequency, kHz; *# of Channels* – radio channel number; *Duty Cycle* – percentage of time to allow transmission; *LBT Rssi* – threshold before transmission; *Max Window (ms)* – maximum size of the transit window used to limit the maximum time/delay; *Antenna Mode* – antenna port function assignment; *Node ID* – node ID; *Dent ID* – ID of the remote node for communication; *Net Count* – total number of networks on one master node; *Ser. brk. x10 ms* – disruption detection time in milliseconds

модем ретранслятора 2 – канал 1; радиомодем ретранслятора 3, БПЛА 1 – канал 2), образуется ретрансляционная пара. Особенность применения данной схемы ретрансляции сигнала заключается в невозможности прямого подключения GSC к БПЛА 1, сигнал всегда будет перенаправляться через ретранслятор из-за разных идентификаторов сети (рис. 7).

Для применения системы на отдельном БПЛА на удалении от базовой станции необходимо добавлять дополнительный радиомодем для связи GSC с БПЛА 2 – носителем ретранслятора [17], поскольку пара радиоте-

леметрий, образующих ретранслятор сигнала, не подключается к полетному контроллеру БПЛА 2 для управления им, что увеличивает количество применяемого оборудования.

В данной системе применяется прошивка радиомодема RFD SiK Compliant (сеть состоит из двух модемов). Настройка радиомодема осуществляется при помощи программного обеспечения RFD900 Tools (рис. 8).

При этом ретранслятор может быть помещен на носитель БПЛА либо находиться на земле для прямой связи рабочего БПЛА с базовой станцией.

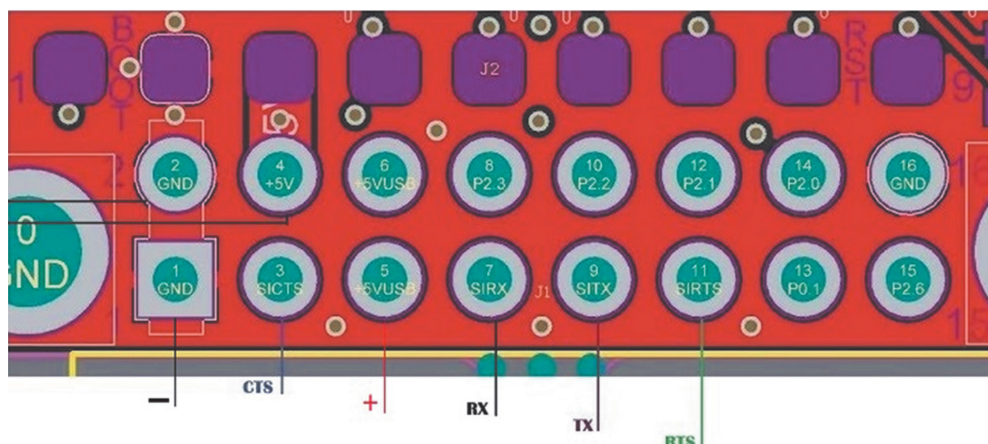


Рис. 6. PIN схема радиомодема RFD900x:

1 – заземление (ground); 2 – питание (5 V); 3 – освобождает канал для отправки данных;
4 – прием сигнала; 5 – отправка сигнала; 6 – выполняет запрос на отpravку сигнала

Fig. 6. PIN diagram of the RFD900x radio modem:

1 – ground; 2 – power supply (5 V); 3 – releases the channel to send data;
4 – receiving a signal; 5 – sending a signal; 6 – executes a request for sending a signal

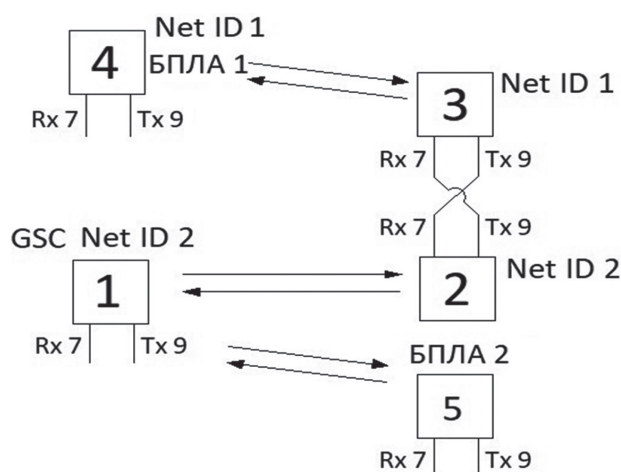


Рис. 7. Схема передачи сигнала через ретрансляционную сеть:

1 – радиомодем GSC (базовой станции);
2 – первый радиомодем ретранслятора;
3 – второй радиомодем ретранслятора;
4 – радиомодем, установленный на беспилотном летательном аппарате;
Net ID – идентификатор сети;
БПЛА 1 – беспилотный летательный аппарат, выполняющий полет по рабочему маршруту;
БПЛА 2 – беспилотный летательный аппарат – носитель ретранслятора; 5 – радиомодем, установленный на беспилотном летательном аппарате носитель

Fig. 7. Signal transmission scheme via a relay network:

1 – GSC radio modem (base station);
2 – the first repeater radio modem;
3 – the second repeater radio modem; 4 – radio modem installed on the unmanned aerial vehicle;
Net ID – network identifier; UAV 1 – unmanned aerial vehicle flying along the working route;
UAV 2 – unmanned aerial vehicle repeater carrier;
5 – radio modem installed on the unmanned aerial vehicle carrier

Так как работы проводятся на труднодоступных участках с обтеканием рельефа на высоте полета 40–45 м [18], бывают случаи аварийной посадки БПЛА, выполняющего рабочий полет (в связи с неточностью карты высот рельефа). В таких ситуациях, когда сигнал с аварийного маяка не поступает на базу, данная система может использоваться как поисковая, передавая данные о местоположении непосредственно с полетного контроллера.

Питание ретранслятора осуществляется от источника питания коптера, но также возможна установка внешнего питания с подключением отдельной батареи.

Результаты исследования и их обсуждение

Для проверки качества передачи сигнала используется параметр RSSI – это значение мощности сигнала, поступающего на антенны устройства [19, 20]. Показатель RSSI означает мощность сигнала, принятого прибором².

При работе пары радиомодемов (GSC – БПЛА 1) график RSSI выглядит следующим образом (рис. 9).

Для определения пары, наиболее подходящей для работы в ретрансляционной сети, проводилось сравнение радиомодемов различных частот и серий.

При работе пары телеметрий ретранслятора на одинаковой частоте они создают помехи друг на друга [21] (рис. 10).

² Received Signal Strength Indication (RSSI) // Ardupilot.org. Режим доступа: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-rssi-received-signal-strength-indication.html> (дата обращения: 25.05.2024).

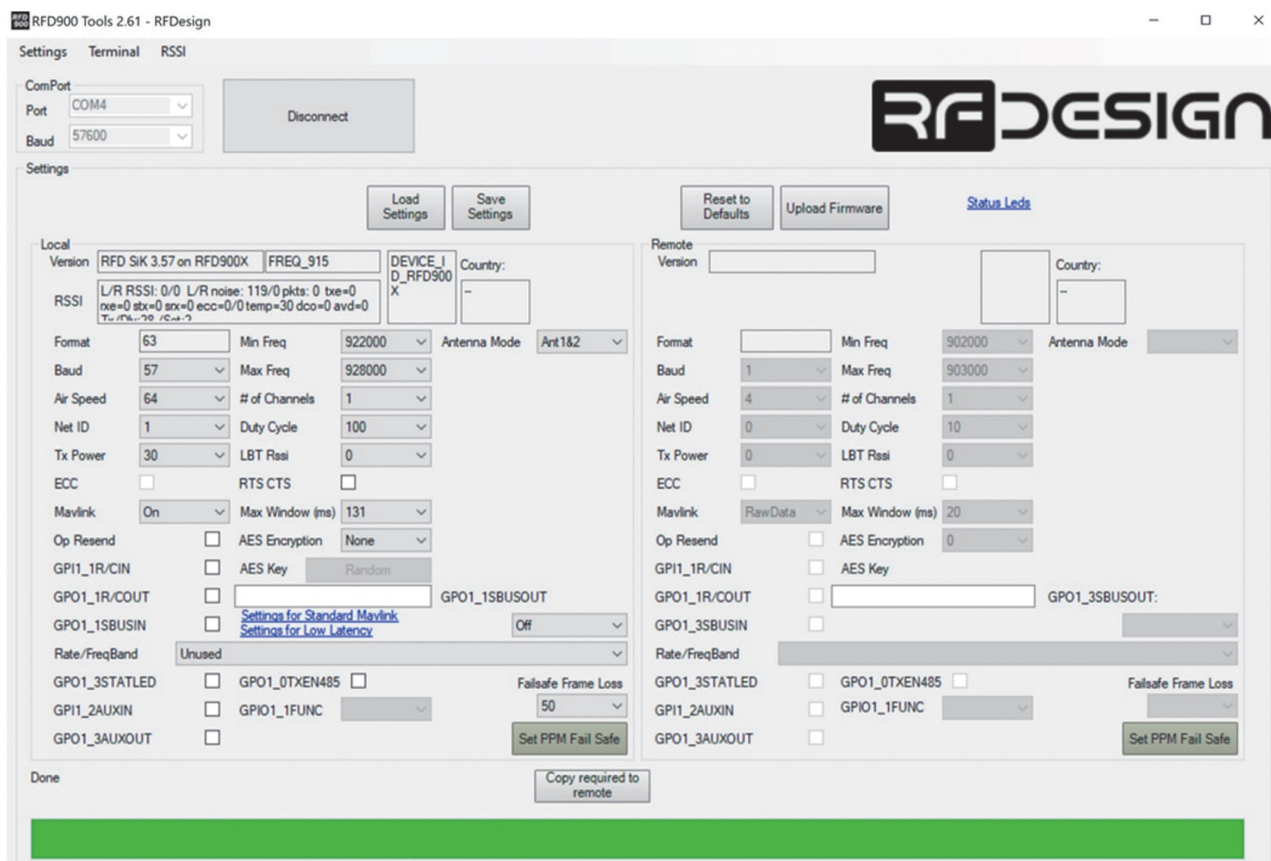


Рис. 8. Параметры настройки RFD-модема прошивки SiK
 Fig. 8. SiK firmware RFD modem settings

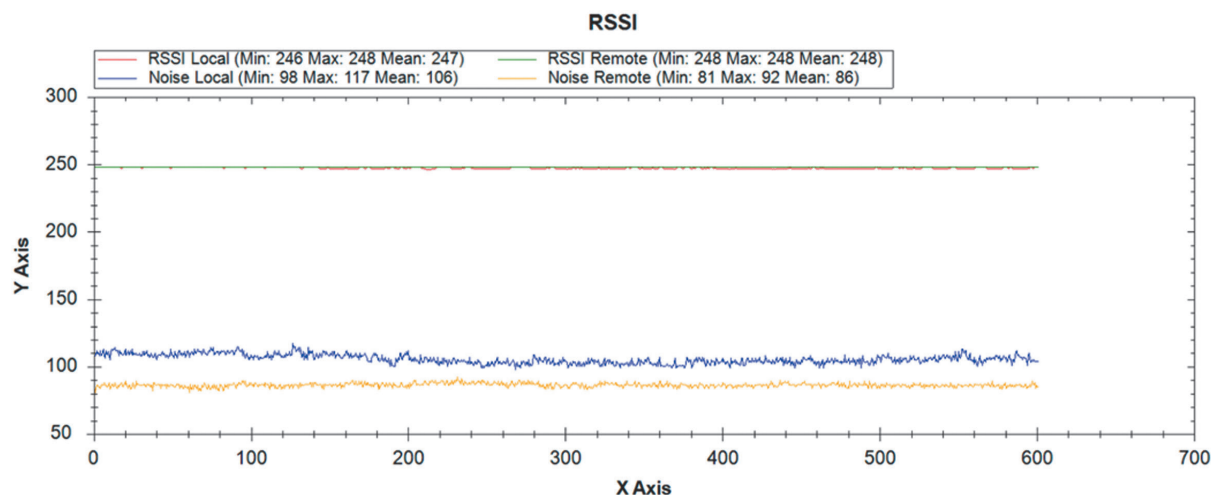


Рис. 9. График RSSI при использовании пары телеметрий:
 Y Axis – мощность сигнала, принятого устройством; X Axis – время работы, с;
 RSSI Local – локальный RSSI; RSSI Remote – дистанционные радиопомехи RSSI;
 Noise Local – локальные радиопомехи; Noise Remote – дистанционные радиопомехи
 Fig. 9. RSSI graph when using a pair of telemetry:
 Y Axis – strength of the signal received by the device; X Axis – operation time, s;
 RSSI Local – local RSSI; RSSI Remote – remote radio interference RSSI;
 Noise Local – local radio interference; Noise Remote – remote radio interference

Для устранения шумов было опробовано использование направленных антенн и применение экранирования телеметрий ретранслятора в паре друг от друга (рис. 11). Для экраниро-

вания помех, которые создаются при близком нахождении двух телеметрий применялись экраны, покрытые алюминиевой самоклеящейся фольгой для экранирования в 100 дБ.

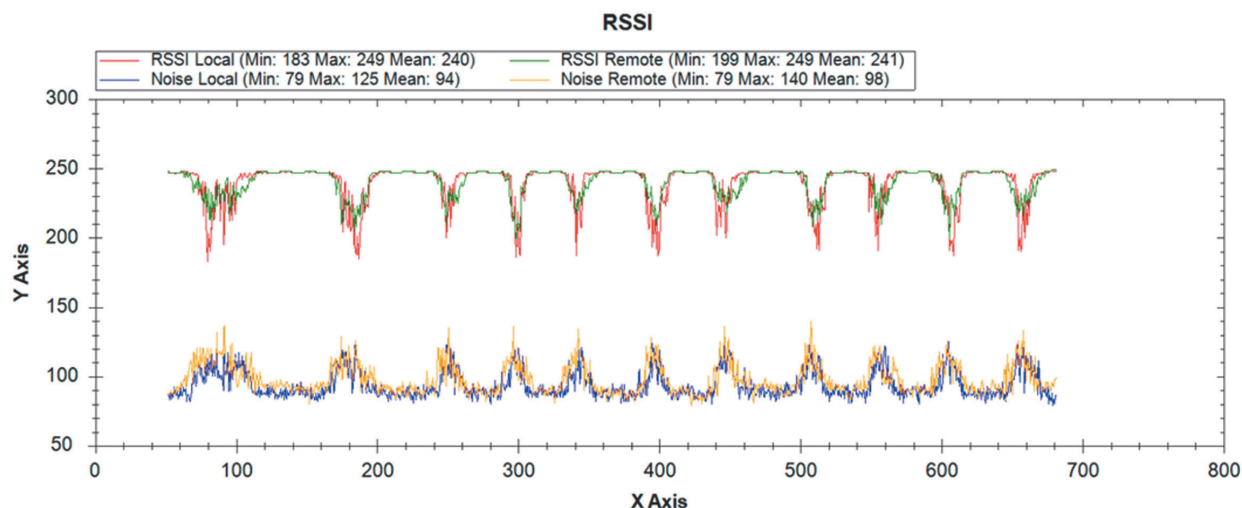


Рис. 10. График RSSI через разнонаправленные антенны без экранирования радиомодемов
Fig. 10. RSSI graph via multidirectional antennas without radio modem shielding

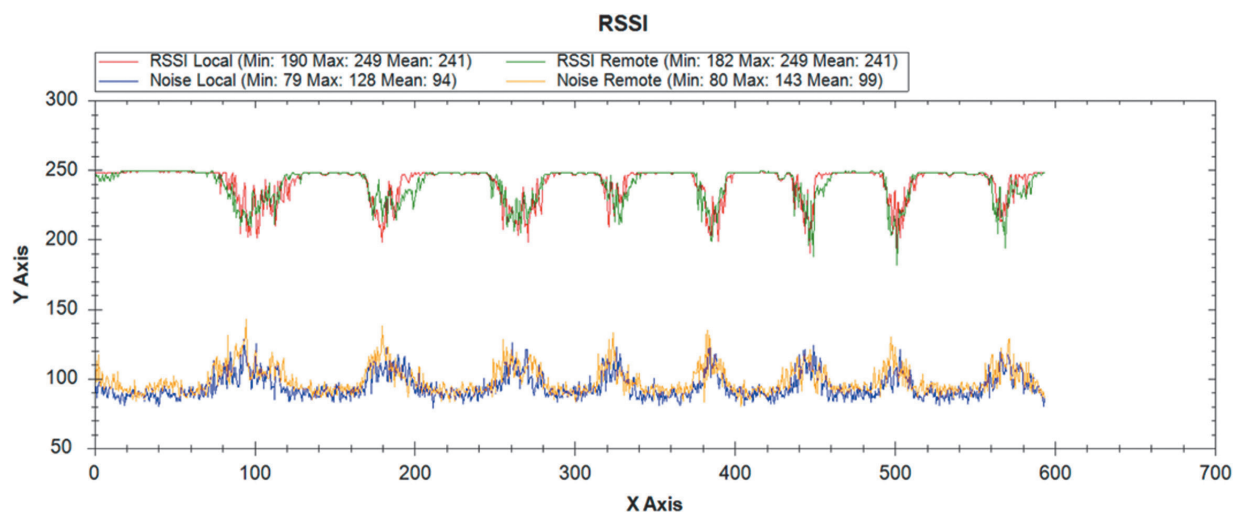


Рис. 11. График RSSI при использовании направленных антенн с экранированием радиомодемов
Fig. 11. RSSI graph when using directional antennas with radio modem shielding

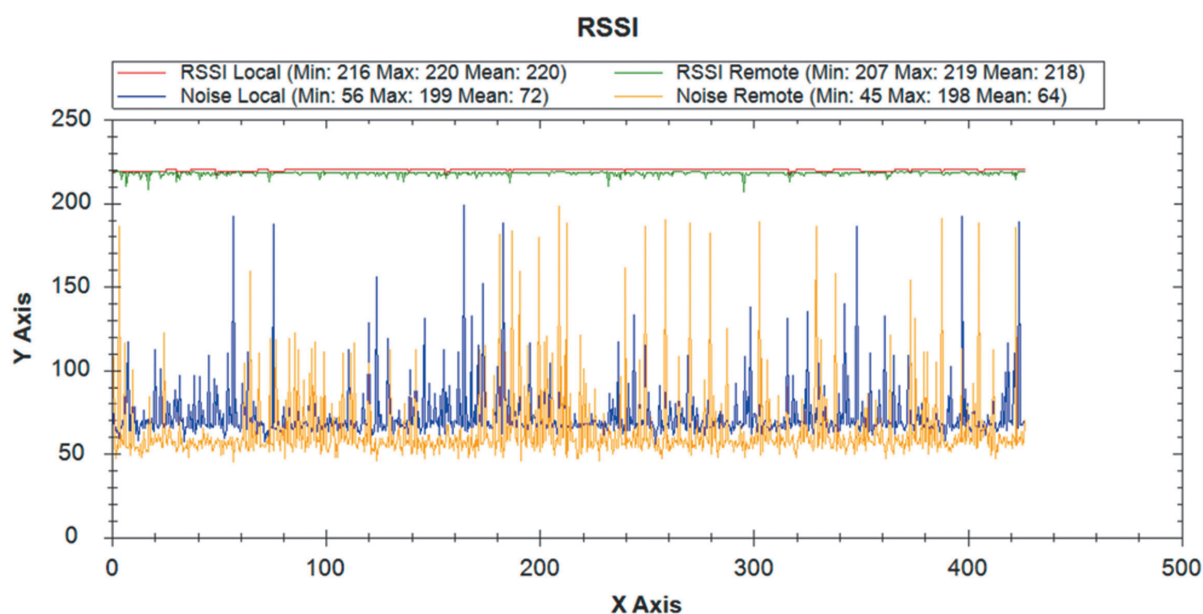


Рис. 12. График RSSI при использовании радиотелеметрий серии X и A
Fig. 12. RSSI graph when using X and A series radio telemetry

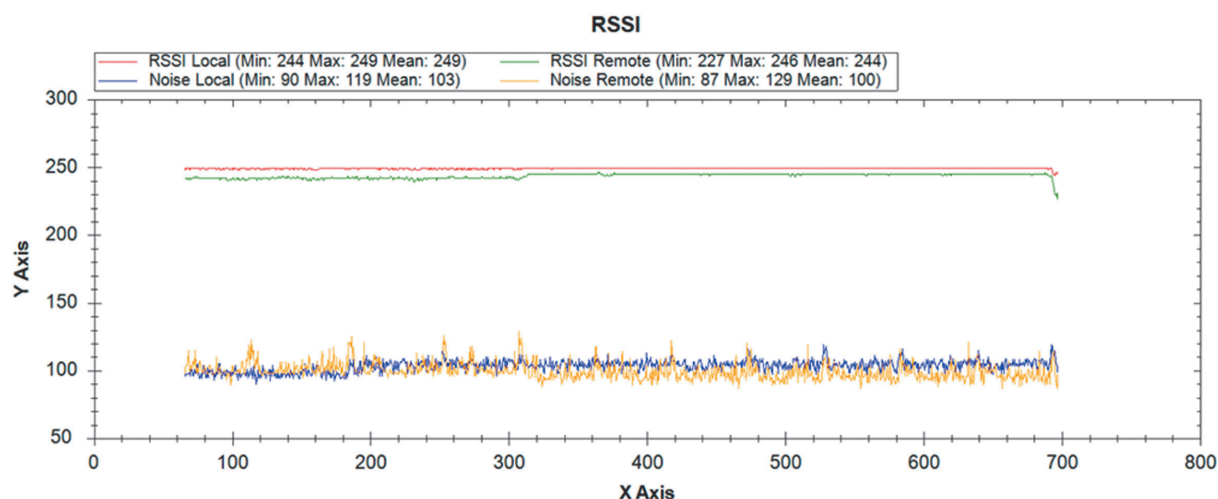


Рис. 13. График RSSI при использовании радиотелеметрий разной частоты одной серии
Fig. 13. RSSI graph when using same series radio telemetry of different frequencies

Исходя из графика, видно, что шумы и их частота сохраняются и при экранировании, следовательно использование радиомодемов одной частоты не удовлетворяет нашим задачам.

Во втором случае использовали радиотелеметрии разных серий. Из-за отличающейся архитектуры самих модемов при подключении возникают очень сильные шумы, которые мешают передаче сигнала (рис. 12).

В третьем опыте использованы радиотелеметрии с разными частотами одной серии. В этом варианте радиомодемы в паре не создают помехи друг для друга, что повышает качество передаваемого сигнала (рис. 13).

Исходя из представленных данных применение радиотелеметрий разных частот предпочтительней в связи с минимальным количе-

ством наведенных шумов и качеством передачи сигнала.

Закключение

Результаты практических испытаний показывают, что использование ретрансляторной пары повышает качество и устойчивость связи между БПЛА и GSC с установленной на ней базой RTK и устраняет проблему потери связи с телеметрией БПЛА в условиях сложного рельефа. Это позволяет передавать поправки координат положения коптера на всем протяжении полета, что дает возможность проводить БПЛА-съемку с использованием системы кинематики реального времени с высокой точностью, недостижимой при использовании стандартной передачи данных напрямую от базовой станции к БПЛА.

Список источников

1. Gantimurova S.A., Parshin A.V., Erofeev V.V. GIS-based landslide susceptibility mapping of the Circum-Baikal Railway in Russia using UAV data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Iss. 18. P. 3629. <https://doi.org/10.3390/rs13183629>. EDN: RHIFUT.
2. Гантимурова С.А., Паршин А.В., Костерев А.Н., Субботина Д.А., Кошкин И.О., Лобузов И.В. [и др.]. Исследование опасных скально-обвальных участков кругобайкальской железной дороги по данным беспилотных съемок // Новые идеи в науках о Земле: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 06–07 апреля 2023 г.). М., 2023. С. 213–216. EDN: BQAGMG.
3. Бояркин Г.А. О выполнении топографо-геодезических работ современными методами // Научное обозрение. 2016. № 1. С. 1–9. EDN: UYVOYR.
4. Паршин А.В. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов при выполнении геологоразведочных работ на рудных объектах байкальской горной области // Вопросы естествознания. 2015. № 2. С. 97–101. EDN: UZEJXX.
5. Полынкин А.В., Ле Х.Т. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 7-2. С. 98–107. EDN: RNKKQD.
6. Войтенко К.И., Зеленский В.П. Применение системного подхода при разработке устройства ретрансляции сигналов ГЛОНАСС, GPS // Системный анализ в проектировании и управлении: сб. науч. тр. XXIII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 10–11 июня 2019 г.). СПб.: 2019. № 1. С. 385–391. EDN: HDSJYQ.
7. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н., Морозов В.А., Михалёв А.О. [и др.]. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования



и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 1 // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 144–149. [http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(144-149\)](http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(144-149)). EDN: XQRZBH.

8. Паршин А.В., Будяк А.Е., Блинов А.В., Костерев А.Н., Морозов В.А., Михалёв А.О. [и др.]. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях. Часть 2 // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 150–155. [http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.

9. Терехин С.Н., Синешук Ю.И. Анализ систем спутниковой радионавигации, базирующихся на различных методах ретрансляции // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2011. № 4. С. 42–47. EDN: PFFRIJ.

10. Митрохин В.Е., Зиновьев Н.В. Использование пассивных ретрансляторов для улучшения качества радиосвязи в сложной электромагнитной обстановке // Известия Транссиба. 2021. № 1. С. 142–148. EDN: IAZSNV.

11. Ержанкызы А., Шульц Р., Левин Е., Орынбасарова Э.О. Использование данных аэрофотосъемки для наземного лазерного сканирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. № 10. С. 69–74. EDN: YQHESD.

12. Широкова Т.А., Антипов А.В., Арбузов С.А. Определение изменений на местности с применением данных лидарной съемки // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 1. № 4. С. 39–46. EDN: PCYYNL.

13. Whitehead K., Hugenholtz C.H. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges // Journal of Unmanned Vehicle Systems. 2014. Vol. 2. Iss. 3. P. 69–85. <http://dx.doi.org/10.1139/juvs-2014-0006>.

14. Варфоломеев А.Ф., Чудайкина О.Ю. Использование RTK-режима систем глобального позиционирования GPS и ГЛОНАСС при проведении топографических работ // Огарёв-online. 2015. № 4. С. 1–8. EDN: TNDBYJ.

15. Мисиров С.А., Беспалова Л.А., Магаева А.А., Беспалова Е.В. Исследование овражно-балочной сети южного берега Таганрогского залива с использованием беспилотных летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2019. № 4. С. 77–83. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2019-4-77-83>. EDN: BWCPDF.

16. Шаталов Н.В. Особенности классификации БПЛА самолетного типа // Перспективы развития информационных технологий. 2016. № 29. С. 34–49. EDN: VVUFEX.

17. Кузнецов Д.А., Митрошина П.О., Сагдеев А.К., Сёмин А.А. Особенности построения радиоканала с беспилотным летательным аппаратом // Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2. № 2. С. 82–88. EDN: OFRIYL.

18. Parshin A.V., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E., Morozov V.A. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey // Geo-spatial Information Science. 2018. Vol. 21. Iss. 1. P. 67–74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>. EDN: XXHXRZ.

19. Кокорева Е.В., Костюкович А.Е. Результаты натурных испытаний системы определения местоположения в сети Wi-Fi // Экономика и качество систем связи. 2021. № 3. С. 64–71. EDN: EWYYZC.

20. Lavrukhin V.A., Lezhepekov A.S., Vladyko A.G. Experimental testbed for access point selection in IoT Wi-Fi networks // Труды учебных заведений связи. 2017. Т. 3. № 2. С. 102–112. <https://doi.org/10.31854/1813-324x-2017-3-2-102-112>. EDN: YTXOSV.

21. Панов И. Помехи в радиоэфире и как с ними бороться // T-Comm: Телекоммуникации и Транспорт. 2009. № 5. С. 22–28. EDN: KXXKBR.

References

1. Gantimurova S.A., Parshin A.V., Erofeev V.V. GIS-based landslide susceptibility mapping of the Circum-Baikal Railway in Russia using UAV data. *Remote Sensing*. 2021;13(18):3629. <https://doi.org/10.3390/rs13183629>. EDN: RHIFUT.

2. Gantimurova S.A., Parshin A.V., Kosterev A.N., Subbotina D.A., Koshkin I.O., Lobuzov I.V., et al. Studying dangerous rock-landslide sections of the Circum-Baikal Railway based on unmanned survey data. In: *Novye idei v nauках o Zemle: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = New ideas in Earth sciences: Proceedings of the 16th International scientific and practical conference*. 06–07 April 2023, Moscow. Moscow; 2023, p. 213–216. (In Russ). EDN: BQAGMG.

3. Boyarkin G.A. The execution of topographic and geodetic activities by modern methods. *Nauchnoe Obozrenie*. 2016;1:1–9. (In Russ). EDN: UYVOYR.

4. Parshin A.V. Prospects of using drones for geological exploration of ore deposits at Baikal mountainous area. *Voprosy Estestvoznaniya*. 2015;2:97–101. (In Russ). EDN: UZEJXX.

5. Polynkin A.V., Le H.T. Analysis of characteristics of UAV communication link. *Proceedings of the TSU*. 2013; 7-2:98–107. (In Russ). EDN: RNKKQD.

6. Voitenko K.I., Zelensky V.P. Using a systematic approach in the development of a GLONASS, GPS signal relay device. In: *Sistemnyi analiz v proektirovanii i upravlenii: sb. nauch. tr. XXIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = System analysis in design and control: collected scientific papers of the 23rd International scientific and practical conference*. 10–11 June 2019, Saint Petersburg. Saint Petersburg; 2019, iss. 1, p. 385–391. (In Russ). EDN: HDSJYQ.

7. Parshin A.V., Bydyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N., Morozov V.A., Mikhalev A.O., et al. Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structural-geological mapping and prospecting for ore deposits in composite topography. Part 1. *Geography and Natural Resources*. 2016;6:144–149. (In Russ). [http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(144-149\)](http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(144-149)). EDN: XQRZBH.

8. Parshin A.V., Bydyak A.E., Blinov A.V., Kosterev A.N., Morozov V.A., Mikhalev A.O., et al. Low-altitude unmanned aeromagnetic survey in management of large-scale structural-geological mapping and prospecting for ore deposits



in composite topography. Part 2. *Geography and Natural Resources*. 2016;6:150-155. (In Russ). [http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(150-155\)](http://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(150-155)). EDN: XQRZBR.

9. Terehin S.N., Sineshyk Yu.I. Analysis of systems of satellite radionavigation, being based on different methods of retransmitting. *Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2011;4:42-47. (In Russ). EDN: PFFRIJ.

10. Mitrokhin V.E., Zinoviev N.V. The use of passive repeaters to improve radio communications in complex electromagnetic environment. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2021;1:142-148. (In Russ). EDN: IAZSNV.

11. Yerzhankyzy A., Shults R., Levin E., Orynbassarova E.O. Using aerial survey data set for terrestrial laser scanning referencing. *Interexpo Geo-Siberia*. 2018;10:69-74. (In Russ). EDN: YQHESD.

12. Shirokova T.A., Antipov A.V., Arbuzov S.A. Area change detection using laser scanning data. *Interexpo Geo-Siberia*. 2012;1(4):39-46. (In Russ). EDN: PCYYNL.

13. Whitehead K., Hugenholtz C.H. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. 2014;2(3):69-85. <http://dx.doi.org/10.1139/juvs-2014-0006>.

14. Varfolomeev A.F., Chudaikina O.Yu. RTK mode of global positioning systems of GPS and GLONASS for topographical works. *Ogarev-online*. 2015;4:1-8. (In Russ). EDN: TNDBYJ.

15. Misirov S.A., Bepalova L.A., Magaeva A.A., Bepalova E.V. Investigation of the ravine-beam network of the southern coast of the Taganrog Bay using unmanned aerial vehicles. *Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus Region. Natural Sciences*. 2019;4:77-83. (In Russ). <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2019-4-77-83>. EDN: BWCPDF.

16. Shatalov N.V. Classification features of aircraft-type UAVs. *Perspektivy Razvitiya Informatsionnykh Tekhnologii*. 2016;29:34-49. (In Russ). EDN: VVUFEX.

17. Kuznetsov D.A., Mitroshina P.O., Sagdeev A.K., Semin A.A. Constructions feature of radio channel with unmanned aerial vehicle. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2016;2(2):82-88. (In Russ). EDN: OFRIYL.

18. Parshin A.V., Blinov A.V., Kosterev A.N., Budyak A.E., Morozov V.A. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multicopter UAV as a promising replacement for traditional ground survey. *Geo-spatial Information Science*. 2018;21(1):67-74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>. EDN: XXHXRZ.

19. Kokoreva E.V., Kostyukovich A.E. Results of positioning system field tests in the WI-FI network. *Economics and Quality of Communication Systems*. 2021;3:64-71. (In Russ). EDN: EWYYZC.

20. Lavrukhin V.A., Lezhepekov A.S., Vladko A.G. Experimental testbed for access point selection in IoT Wi-Fi networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2017;3(2):102-112. <https://doi.org/10.31854/1813-324x-2017-3-2-102-112>. EDN: YTXOSV.

21. Panov I. Radio interference and how to deal with it. *T-Comm*. 2009;5:22-28. (In Russ). EDN: KXXKBR.

Информация об авторах / Information about the authors



Ерофеев Владимир Владимирович,

инженер-исследователь департамента геоинформатики,
Институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,

✉ verofeev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0008-7044-4033>

Vladimir V. Erofeev,

Research Engineer of the Geoinformatics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

✉ verofeev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0008-7044-4033>



Костерев Алексей Николаевич,

ведущий инженер департамента геоинформатики,
Институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,

akosterev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-9262-5697>

Aleksey N. Kosterev,

Leading Engineer of the Geoinformatics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,

akosterev@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0000-0001-9262-5697>



Валькова Евгения Денисовна,
младший научный сотрудник департамента геоинформатики,
Институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
evalkova@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0007-7394-1978>
Evgenia D. Valkova,
Junior Researcher of the Geoinformatics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
evalkova@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0007-7394-1978>



Матыцин Виктор Владимирович,
ведущий инженер департамента геоинформатики,
Институт «Сибирская школа геонаук»,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия,
matyv@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0008-8330-5788>
Viktor V. Matytsin,
Leading Engineer of the Geoinformatics Department,
Siberian School of Geosciences,
Irkutsk National Research Technical University,
Irkutsk, Russia,
matyv@geo.istu.edu
<https://orcid.org/0009-0008-8330-5788>

Вклад авторов / Contribution of the authors

В.В. Ерофеев – написание текста статьи, выполнение исследований, методология работы, разработка концепции статьи.

А.Н. Костерев – подготовка и редактирование материалов статьи, анализ материалов.

Е.Д. Валькова – сбор и обобщение данных литературы, анализ материалов.

В.В. Матыцин – подготовка и редактирование материалов текста.

Vladimir V. Erofeev wrote the article, conducted the research, developed the research methodology and the article concept.

Aleksey N. Kosterev prepared and edited the materials of the article, performed their analysis.

Evgenia D. Valkova collected and summarized the data on the research problem, analysed the obtained materials.

Viktor V. Matytsin prepared and edited the text of the article.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 11.06.2024; одобрена после рецензирования 15.08.2024; принята к публикации 16.09.2024.

The article was submitted 11.06.2024; approved after reviewing 15.08.2024; accepted for publication 16.09.2024